

# ¿SE AJUSTAN LAS FÓRMULAS DE CÁLCULO DEL MANTO A LOS DIQUES EXISTENTES?



**Grupo de Trabajo 2 del Comité Técnico  
de Ingeniería Portuaria (GT2)<sup>1</sup>**

**Ponente: Vicente Negro Valdecantos<sup>2</sup>**

## **ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DEL TRABAJO**

En el II Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas celebrado en Algeciras en octubre de 2006, se presentó una ponencia en la cual se exponía el trabajo realizado por el Grupo de Ingeniería Portuaria CT2 sobre el estudio y análisis de las distintas expresiones de cálculo del manto de los diques de escollera; su origen, naturaleza de los ensayos, rango de validez de los mismos, uso y limitaciones de las fórmulas, proponiendo una hoja electrónica de cálculo específica de diseño preliminar.

Se destacó entre las conclusiones, que en múltiples ocasiones, las condiciones de diseño de los diques en talud quedaban fuera del marco teórico de las fórmulas analíticas; que éstas permitían solamente un dimensionamiento previo; que las condiciones reales difieren de las propias de los ensayos de donde proceden las expresiones teóricas, y, que existía incertidumbre en su empleo, así como, dificultad en la aplicación estricta para los diques con espaldón, banquetta, berma o con determinadas condiciones de filtro y núcleo.

Tras los comentarios y preguntas suscitados en el coloquio, el Grupo de Trabajo de Ingeniería Portuaria CT2, decidió continuar la investigación reflexionando sobre los conocimientos y las posibles lagunas existentes en el empleo de las fórmulas de dimensionamiento de las piezas del manto principal ante el modo de fallo “extracción de las mismas” en un rompeolas.

De la misma manera, el citado Grupo se planteó analizar el ajuste y la fiabilidad de las expresiones ante la realidad de los diques actualmente construidos y en servicio. Por esta razón, y tras una reflexión profunda, cautelosa y exhaustiva, se desa-

---

<sup>1</sup> Asociación Técnica de Puertos y Costas.

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Madrid.

## INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

rolló una metodología para determinar el grado de validez de las expresiones para el cálculo de los mantos de los diques existentes consistente en las siguientes etapas.

1. Análisis de secciones de tramos concretos de diques rompeolas sobre la base del Inventario de Obras de Abrigo, MOPU 1988.
2. Determinación del período de retorno del temporal de cálculo mediante el esquema ROM 0.0, IRE e ISA, para el modo de fallo principal "extracción de piezas del manto" con los datos económicos actualizados,  $C_{RD}/C_0$ .
3. Actualización de los datos de clima marítimo, mediante los datos procedentes de las boyas escalares y direccionales correspondientes tanto en aguas de transición como en aguas profundas con más de veinte años de medición sin interrupción, de las funciones de transferencia, los modelos numéricos en caso de existir, y de los histogramas de  $H_s$  máximos anuales.
4. Comprobación de las secciones del Inventario, con los nuevos datos de clima marítimo obtenidos, mediante el programa de estabilidad del manto desarrollado para el Congreso de Algeciras de octubre 2006 y su posterior revisión realizada a principios de este año 2008.
5. Elaboración de una historia de cada tramo de dique durante su vida útil con el objetivo de estudiar su comportamiento evolutivo y la posible curva de daños.
6. Establecimiento de conclusiones sobre la idoneidad de las expresiones empleadas y el estado de los mantos de las secciones analizadas, evaluando no solo su fiabilidad, sino también el clima marítimo y la forma con la que se diseñó en su día.

En el transcurso de las distintas reuniones del grupo y del desarrollo del trabajo concreto de sus componentes, se elaboraron fichas específicas para cada dique, además de optimizar, mejorar y corregir la hoja de cálculo diseñada en 2006.

Durante estos dos años, se han estudiado un total de quince secciones, en algunas de ellas con varias alineaciones o tramos, siendo éstas las siguientes: Punta Luce-ro, Bilbao; Príncipe de Asturias, Gijón; Dique Norte, San Ciprián, Lugo; Dique de abrigo de Burela, Lugo; Dique de Bermeo, Vizcaya; Dique de Malpica, A Coruña; Dique de Fisterra, A Coruña; Dique de Muxía, A Coruña; Dique de Laxe, A Coruña; Dique de Cillero, Lugo; Dique de Cariño, A Coruña; Dique del Este, Barcelona; Dique de poniente de Ceuta; Dique de abrigo de Alicante. Todas estas secciones constituyen una amplia casuística revisada, analizada y discutida, que ha permitido establecer importantes conclusiones sobre los ajustes de las fórmulas a los diques existentes.

Se incluyen al final de este trabajo a modo de apéndice cada una de las fichas elaboradas de los tramos o secciones de diques analizados.



Figura 1. Ejemplo de fallo en el dique en talud de Bermeo, Vizcaya. Diciembre 2007.

Caso de estudio	Particularidad del tramo o la sección analizada	Historia del dique	Recomendación de uso
Bilbao	Dique reparado sobre manto 85 t Banqueta de bloques de 85 t, piedra de 14 t y bloques de 20 t	No ha recibido la solicitud de diseño	Van der Meer con $N_{od} = 0.20$ y Berenguer $N_{od} = 0$
Gijón	Manto de bloques de 120 t Núcleo de bloques de 90 t Sin berma ni banquetta	Recarga por proceso constructivo	Van der Meer con $N_{od} = 0.20$ y Berenguer $N_{od} = 0$
Barcelona	Sobreestimada la acción. Dique calculado a fallo nulo y con coeficiente de mayoración 1.66	Sin averías en la vida útil	Buen ajuste en general de Hudson, Van der Meer y Berenguer, $H_s$
Ceuta	Infradimensión de la acción. Cambio de pendiente de 2/1 a 1/1 en la isobata -7.00 m	Perfil dinámico en forma de S	Recalcular tras los ensayos
Malpica	Batimetría irregular, presencia de bajos, rebase y rotura de ola	Reposición de bloques	Iribarren en aguas someras

**Tabla 1. Ejemplo de la historia de algunos de los diques analizados**

# INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

Caso de estudio	Particularidad del tramo o la sección analizada	Historia del dique	Recomendación de uso
Malpica corregido	Batimetría irregular, presencia de bajos, rebase y rotura de ola	Refuerzo reciente de bloques	Van der Meer, Berenguer y Hudon ( $H_s$ )
Alicante	Rebase. Dique berma con filtro de tres capas. Talud interior 1/1. Perfil S. Filtro secundario 2 - 5 t	Acción no alcanzada. Sin averías	Buen ajuste en general de Hudson, Van der Meer y Berenguer
San Ciprián	Cambio de talud en la sección 3 y morro, con filtro trapecial de escollera. Retirada del manto de dolos (2.5% rotos). Limitación en rotura. Rebase	Nuevo manto de bloques orientados. 90 t, talud 3/1. Acción alcanzada	Buen ajuste en general de Hudson Van der Meer y Berenguer ( $H_s$ )

**Tabla 1 (Cont.). Ejemplo de la historia de algunos de los diques analizados**

## DESARROLLO DE LOS TRABAJOS

El Inventario de Diques de Abrigo en España (1988) es la evidencia del enorme patrimonio tecnológico, científico y cultural que se dispone en materia de obras de defensa en nuestras fachadas marítimas. Se configura todavía hoy, después de veinte años, como un instrumento de enorme validez para futuros proyectos, inversiones y obras. Es una base de datos que permite un conocimiento previo y estadístico del diseño preliminar de nuestros diques.

Esta referencia ha sido nuestro punto de partida. El análisis completo de las secciones y tramos de rompeolas ha conducido a un estudio de la recurrencia de los temporales, la actualización de los datos de clima y al cálculo pormenorizado de las secciones comparando las consideraciones de diseño (datos de proyecto, punto 1.1 de la ficha técnica del Inventario 1988) con la actualización de las fuentes de datos oceanográficos, los métodos de cálculo, las características principales de la estructura resistente y su historia.

El primer paso metodológico fue concretar el esquema de cálculo empleando las recomendaciones recogidas en la ROM 0.0, permitiendo así especificar el IRE e ISA concreto, la vida útil, probabilidad de fallo y la recurrencia del temporal de diseño para cada dique.

Sobre estas premisas, se desea realizar algunos comentarios observados durante la investigación relativos a la aplicación de la ROM 0.0 en el diseño de diques:

- La ROM 0.0 constituye el marco metodológico para el análisis de obras marítimas y portuarias de todas las tipologías y, concretamente, es el documento que define los criterios generales que habrán de seguir las sucesivas ROM correspondientes a los diferentes tipos de infraestructuras, como son, diques, muelles, pantalanés, duques de alba, dragados, rellenos, etc.
- Como consecuencia de ello, y, a partir del análisis realizado en el Grupo de Trabajo, se elabora un conjunto de cuestiones que se considera conveniente que reci-

ban un tratamiento específico y un desarrollo detallado en el texto de la ROM 1.1, destinado a diques.

- El cálculo del IRE requiere la utilización de parámetros de coste que no son conocidos con suficiente precisión hasta fases más adelantadas de proyecto, lo que puede llevar a un proceso iterativo. Esta situación puede conducir a definir el IRE de manera subjetiva.
- Un aspecto que se deberá tratar en la ROM específica de diques, actualmente en discusión, es la influencia de la forma de fallo (progresiva o frágil) en la selección de su probabilidad, así como, la concreción objetiva del ISA.
- Además la ROM de diques deberá establecer los diagramas de fallo y la distribución de las probabilidades de fallo entre los diferentes modos.
- Finalmente, las ecuaciones de verificación deben estudiarse para conocer su rango de aplicación más adecuado, los ensayos en los que se basan, su forma de elaboración y cómo se obtuvieron los resultados.

A nivel de orientación, el Grupo ha elaborado una propuesta de tabla de los valores razonables de uso, para definir el carácter de la obra, sancionados por la experiencia en el diseño de obras marítimas.

Vida útil (n)	Tipología	Probabilidad Fallo ( $P_f$ )	Probabilidad excedencia	Recurrencia (1/P)
15 años urbanismo local	Playas Espigones	0.20	0.01488	68 años
15 años Medio ambiente local	Emisarios locales Obras menores con fallo rígido	0.10	0.00699	142 años
25 años Interés local	Dique en talud Fallo gradual	0.20	0.00886	112 años
25 años Interés local	Dique vertical Fallo instantáneo	0.10	0.00420	237 años
25 años Litoral urbano	Playa urbana Borde de interés	0.20	0.00886	112 años
50 años Interés general	Dique en talud Fallo gradual	0.20	0.00452	225 años
50 años Interés general	Dique vertical Fallo instantáneo	0.10	0.00210	475 años

**Tabla 2. Valores propuestos para caracterización de la obra**

En segundo lugar, se realizó un análisis de las fuentes de datos climáticos comparando el Inventario y la actualización del Atlas de Clima Marítimo en el Litoral Español. La revisión de las consideraciones de diseño de cada tramo en 1988 (oleaje en

# INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

aguas profundas y a pie de dique, ola de cálculo, carrera de marea) fue cotejada con el estado de mar con fuentes de datos instrumentales y modelos numéricos de propagación, así como, el análisis histórico de cada boya con sus temporales extremos.

A modo de comparación, la tabla 3 presenta resultados de notable interés con el siguiente significado de las variables ambientales de proyecto.

**H (incidente)** Altura de ola expuesta en el apartado 1. Consideraciones de diseño (Datos de Proyecto), caracterización del oleaje a pie de obra del Tomo Diques de Abrigo en España, MOPU, 1988.

**H (cálculo)** Altura de ola expuesta en el apartado 1.2. Ola de cálculo del Tomo Diques de Abrigo en España, MOPU, 1988.

Estos valores de la acción medioambiental vienen generalmente sin apellido, desconociendo la realidad de la altura de ola por geometría estadística,  $H_{1/3}$ ,  $H_{1/10}$ ,  $H_{1/20}$ , si bien, se trata de alturas de ola incidentes a pie de dique.

**$H_s$**  Altura de ola promedio del tercio de olas más altas en estima central incidente a pie de dique tras la actualización de los datos de clima marítimo mediante series históricas de las boyas de registro.

**$H_s$  (90%)** Altura de ola promedio del tercio de olas más altas en la banda de confianza del noventa por ciento, incidente a pie de dique tras la actualización de los datos de clima marítimo mediante series históricas de las boyas de registro.

La tabla adjunta permite la comparación de los datos de los estados de mar y la comprensión de los mantos obtenidos por las fórmulas de diseño preliminar en los diques rompeolas seleccionados.

Dique rompeolas analizado	Consideraciones de diseño (Proyecto) Inventario 1988	Actualización del clima marítimo, 2007
Punta Lucero refuerzo (Bilbao)	H (incidente) = 10.10 m H (cálculo) = 14.50 m	$H_s = 9.49$ m $H_s$ (90%) = 10.61 m
Príncipe de Asturias (Gijón)	H (incidente) = 7.68 m H (cálculo) = 9.68 m	$H_s = 8.39$ m $H_s$ (90%) = 9.49 m
San Ciprián Dique Norte (Lugo)	H (incidente) = 10.50 m H (cálculo) = 14.50 m	$H_s = 10.70$ m $H_s$ (90%) = 11.60 m
Bermeo (Vizcaya)	H (incidente) = 7.13 m H (cálculo) = 8.91 m	$H_s = 9.07$ m
Malpica (A Coruña)	H (incidente) = 10.70 m	$H_s = 10.10$ m
Burela (Lugo)	H (incidente) = 7.45 m H (cálculo) = 9.31 m	$H_s = 8.60$ m

**Tabla 3. Comparación de los datos de proyecto 1988-2007**

Dique rompeolas analizado	Consideraciones de diseño (Proyecto) Inventario 1988	Actualización del clima marítimo, 2007
Fisterra (A Coruña)	H (incidente) = 5.00 m H (cálculo) = 6.25 m	$H_s = 6.65$ m
Laxe (A Coruña)	H (incidente) = 5.00 m H (cálculo) = 6.25 m	$H_s = 7.85$ m
Cariño (Lugo)	H (incidente) = 5.00 m	$H_s = 4.30$ m
Celeiro (Lugo)	H (incidente) = 6.25 m	$H_s = 6.10$ m
Dique del Este (Barcelona)	H (incidente) = 8.00 m	$H_s = 7.20$ m $H_s (90\%) = 7.90$ m
Dique de levante (Alicante)	H (incidente) = 3.20 m H (cálculo) = 3.34 m	$H_s = 4.37$ m $H_s (90\%) = 4.96$ m
Ceuta	Sin datos	$H_s = 5.00$ m
Muxía (A Coruña)	H (incidente) = 2.12 m	$H_s = 2.30$ m
Panxón (Pontevedra)	H (incidente) = 3.18 m	$H_s = 3.80$ m

**Tabla 3 (Cont.). Comparación de los datos de proyecto 1988-2007**

Con estos datos y la hoja de cálculo electrónica de diseño preliminar, se procedió al estudio de las secciones y tramos concretos de los diques seleccionados, definiendo los pesos de las unidades del manto principal a partir de los estados de mar extremos según el Inventario (apartado 1) y la actualización de la ROM 0.3/91 o los regímenes de temporales de la página web del Organismo Público Puertos del Estado ([www.puertos.es](http://www.puertos.es))

Todos estos datos se recogieron en una ficha explicativa cuyo ejemplo tipo se adjunta como apéndice al final del presente artículo.



**Figura 2. Ejemplo de rebase en el dique rompeolas de Malpica, A Coruña. Marzo 2007.**



## INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

Este repaso de múltiples secciones y tramos de la realidad de nuestros diques, ha permitido el análisis de un total de quince obras sobre un número de 294 expuestas en el Inventario de 1988, con una longitud de 12 km sobre el total que alcanza los 180 km, ofreciendo la panorámica de reflexiones y matizaciones profundas, destacando:

- Gran parte de nuestros diques responden a una casuística diversa y muy distinta a la que ha dado lugar a las formulaciones teóricas. Las fórmulas con las que se ha dimensionado están planteadas bien para oleaje regular o para irregular, así como para talud indefinido, sin rebase, sin espaldón, sin banquetta o berma sobre un suelo compacto no socavable.
- Existe además una notable diferencia entre los diques en gran profundidad y los diques en aguas someras. En España el 58% de nuestros diques tiene una profundidad inferior a los 10 metros.
- La complejidad de los procesos físicos en la naturaleza representados por su aleatoriedad e irregularidad no ha sido tomada en cuenta en toda su entidad, existiendo diferencias significativas cuando las fórmulas se aplican sobre diques en aguas someras, en aguas de transición o en grandes profundidades
- El comportamiento de un dique rompeolas, ante la energía de un estado de mar, está fuertemente relacionado con el índice de huecos del macizo y sus capas. No disponemos de ensayos en laboratorio de las mismas secciones de dique variando el peso del núcleo  $W_{\max} = 5 \text{ kg}$ ;  $W_{\max} = 100 \text{ kg}$  o  $W_{\max} = 500 \text{ kg}$ .
- La altura de ola de cálculo a considerar en las expresiones de diseño preliminar debe ser la " $H_s$ " incidente a pie de dique.
- Cuanto más huecos presenta un manto, menor reflexión estructural existe y, con ello, un mejor ajuste a las expresiones de diseño, generalmente desarrolladas para una cierta permeabilidad de la masa del dique. Este puede ser el motivo histórico de considerar como acción predominante la altura de ola incidente a pie de dique.
- En diques a gran profundidad, las acciones suelen requerir el empleo de unidades artificiales en el manto. El cubo, según va siendo solicitado por las olas, tiende a



Figura 3. Ejemplo de talud con bloques Antifer, Ashdod, Israel. Julio 2007.



presentar un modo de fallo ligeramente más frágil, disminuyendo el índice de huecos en la zona inferior al acumularse las piezas en las partes más bajas, dejando mayores huecos en zonas superiores próximas a la coronación. El manto, aunque gana en seguridad a inicio de avería, tiende a presentar un fallo más rígido, transformando su comportamiento inicial de diseño a uno de superior fragilidad.

- También es cierto que el bloque paralelepípedo con sus posiciones de ajuste tiende a encontrar una situación más estable en el manto.
- En diques a gran profundidad, las piezas macizas que rellenan espacio tienden a minimizar los huecos, incrementando las componentes de reflexión y rebase frente a la disipación de energía en el manto.
- El funcionamiento del bloque paralelepípedo<sup>1</sup> es diferente dada su configuración con una dimensión mayor que la cara del cubo o la arista del mismo. Se recomienda ensayar la misma sección de un rompeolas variando las piezas que constituyen su manto, empleando cubos y bloques del mismo peso unitario y comprobando su estabilidad y la evolución de la curva de daños.
- Aparentemente el comportamiento del bloque es más estable que el cubo, tanto por su disposición en el manto, como por su índice de huecos y en la forma de disipar la energía en los mismos.
- Se recomienda el empleo de bloques con dimensiones hasta de  $a \times a \times 1.30 a$ . Su comportamiento ante la avería o el fallo es distinto al del cubo.
- Los diques estudiados hasta el momento son ejemplo de diversidad y dificultad en la aplicación de las expresiones de diseño.
- Se recomienda efectuar ensayos de laboratorio para determinar y comprobar la estabilidad estructural y funcional de las secciones preliminares diseñadas de los diques rompeolas con las fórmulas de ajuste específicas, sancionadas por la experiencia y la práctica.

Después del análisis de los criterios de diseño, el empleo de las fórmulas y la prolija casuística de diques analizados mediante la hoja electrónica presentada en el Congreso de Algeciras, su historia y peculiaridades, así como, la elaboración de la ficha concreta para cada tramo, empezaron a aparecer ideas previas que suscitan el debate con relación a este modo de fallo y a las expresiones existentes, avalados por la experiencia para el diseño previo de esta tipología de secciones. Éstas fueron:

- Parece recomendable el uso de formulaciones que permiten diferenciar los distintos niveles de daño.

---

<sup>1</sup> En adelante, bloque.

# INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN



Figura 4. Ejemplo de construcción con basculante del núcleo de bloques del Príncipe de Asturias, Gijón.

- La expresión de Iribarren presenta notables dificultades de uso en grandes profundidades, derivada principalmente de la definición de la altura de ola ( $A$ ) en su expresión, dado que no recoge la aleatoriedad de los procesos, la irregularidad del sistema y la sensibilidad a otras variables, como son, el período del oleaje, la duración de la acción y la evolución del daño.
- El empleo de la fórmula de Iribarren proporciona resultados bastante coherentes para diques pequeños con limitaciones de las acciones por fondo y mantos de escollera natural.
- La expresión de Hudson se ajusta bastante bien con  $H_s$ , para piezas prefabricadas de hormigón, presentando mayores dispersiones con otras formulaciones en el caso de escolleras naturales recomendando en este último la utilización de  $H_{1/10}$ .
- Se han observado resultados razonables en el empleo de la expresión de Berenguer y Baonza con  $N_{od} = 0$  y de Van der Meer, con  $N_{od}$  entre 0.20 y 0.50. Ambas expresiones se ajustan en rompeolas de manto de cubos/bloques de manera notable en gran profundidad.
- Se recomienda el empleo de la expresión de Van der Meer con un valor de  $N$  y  $N_{od}$  para cubos con el siguiente criterio:

$N = 1.000$  en el Mediterráneo y Alborán.

$N = 3.000$  en el Cantábrico.

$N = 3.000-5.000$  en el Atlántico Norte.

$N = 1.500-2.000$  en el Atlántico Sur.

$N = 7.500$ , estabilización de la avería.

$N_{od} = 0.20$  a  $0.50$ .

- En la fórmula de Miguel Losada se ha adoptado el uso de la función de estabilidad ( $\psi$ ) cuyos valores se recogen en el Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Volume 1, Wave Phenomena and Coastal Structures, Chapter 21, Recent development in the design of mound breakwaters de 1990, así como, la correlación  $\lambda \times H_s - T_0 - \xi_0$ , siendo " $\lambda$ ", 1,80 para diques en el Mar Cantábrico y Océano Atlántico y 1,60 para el Mediterráneo.
- Todos los diques analizados son bastante particulares, tal como se ha podido observar en la tabla 1, por diferentes causas: disponer de núcleo de bloques (Gijón), actuar sobre una sección averiada (Punta Lucero), presentar problemas batimétricos y de rebase (Malpica); estar sobredimensionado (Barcelona); ser un refuerzo (San Ciprián), disponer de perfil dinámico en S como Alicante y Ceuta, por citar algunos ejemplos significativos.



Figura 5. Enlace dique rompeolas con vertical. Dique Torres en Gijón. Septiembre 2007.



Figura 6. Dique de Bares, Lugo. 2007.

- La aplicación de las expresiones teóricas es, en consecuencia, un motivo de reflexión y precaución, ya que los diques reales difícilmente responden a las condiciones de desarrollo de las fórmulas de diseño preliminar. Este hecho aboga por la sistematización de la realización de ensayos en modelo físico para el diseño final de los diques.
- Como se comentó con anterioridad, la expresión de Hudson está bastante ajustada en diques en gran profundidad, debiendo escoger la acción entre un valor de  $H_{1/3}$  o próximo a él y no  $H_{1/10}$  para bloques prefabricados de hormigón.
- Se considera razonable y, por ello, se recomienda el uso de un coeficiente o margen de seguridad sobre el peso estricto que se obtiene de las expresiones de cálculo, a no ser que el criterio de inicio de averías se asimile a un estado límite de servicio.
- En muchas ocasiones, dentro de los límites de equipos y materiales, el empleo de una unidad de manto de peso ligeramente superior no representa un encarecimiento o desvío presupuestario de los diques, pero sí, aumenta el grado de seguridad de los mismos.



Figura 7. Dique de Llanes. Cubos de la memoria. Marzo 2006.

- Se considera conveniente analizar el coste marginal de un incremento de seguridad de la obra, derivado de la utilización de piezas de peso ligeramente superior, según se ha indicado en las conclusiones precedentes, pues puede resultar muy reducido.

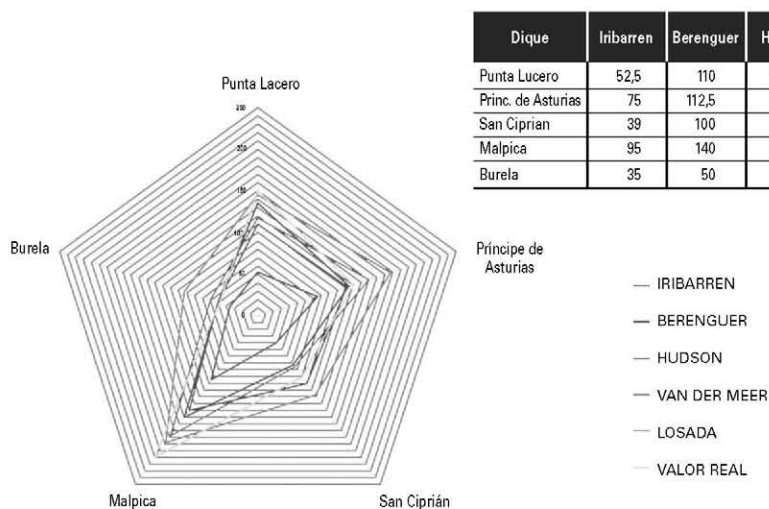
Estas ideas siguen teniendo el mismo carácter de debate, reflexión y matización sobre los distintos comportamientos de nuestros diques y el cálculo de la estabilidad del manto ante el modo de fallo “extracción de unidades del mismo”, permitiendo, no solo ampliar los objetivos del Grupo, sino mejorar el empleo de las expresiones de Algeciras y su rango de validez.

Para la obtención de todos los resultados expuestos hasta el momento se elaboró una ficha de síntesis para cada uno de los diques o tramos de dique analizados. Como se expresó en los antecedentes se estudiaron quince secciones de distintas fachadas, profundidades, mantos exteriores y solicitaciones de diseño. Desde el refuerzo de Punta Lucero en Bilbao a la sección de reparación del dique de poniente de Ceuta, pasando por el dique del Este de Barcelona o la sección de núcleo permeable del Príncipe de Asturias en Gijón, esta prolija casuística facilitó la elaboración de conclusiones y nuevos campos de trabajo relacionados con el diseño preliminar de los rompeolas.

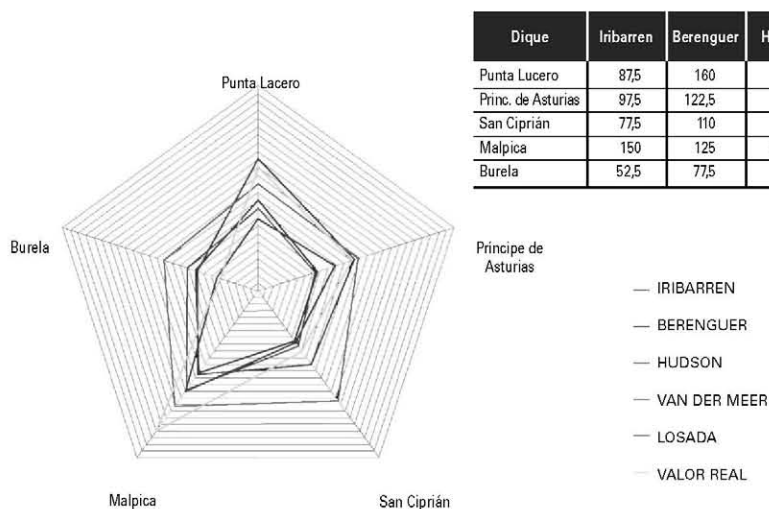
# INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

Al final de este artículo, a modo de ejemplo, se expone una de las fichas tipo elaboradas para cada sección.

Realizados los análisis con relación a las consideraciones de diseño sobre la base de la ROM 0.0, los estados de mar, tanto con las acciones del Inventario como con los datos de clima marítimo actualizados con los medios disponibles, al empleo de las fórmulas de diseño preliminar, a las ideas sobre el ajuste a secciones reales y a la validez de las expresiones tras el cálculo de las mismas con el oleaje del Inventario y el actual, nos lleva a la siguiente propuesta de conclusiones que se recogen en el siguiente epígrafe.



**Tabla 4. Comparación de las distintas fórmulas con los datos de proyecto del Inventario de Diques de Abrigo**



**Tabla 5. Comparación de las distintas fórmulas con los datos de proyecto actualizados ROM y [www.puertos.es](http://www.puertos.es)**



## CONCLUSIONES FINALES Y NUEVAS LÍNEAS DE TRABAJO

A la vista del trabajo realizado por el Grupo durante estos dos años de debate, reuniones e investigación sobre los objetivos propuestos, se pueden establecer las siguientes conclusiones preliminares consecuencias de la reflexión y el análisis. Éstas son:

- Con la aplicación en este trabajo de la ROM 0.0, se ha tratado de detectar temas que se consideran convenientes para su desarrollo en el marco de la ROM 1.1 (Obras de Abrigo), por su incidencia en el proceso de diseño.
- Con relación a las fórmulas analizadas en esta investigación y sancionados por la experiencia, en diques a gran profundidad se puede recomendar y adherirse a la propuesta del nuevo Rock Manual, CIRIA – CUR – CETMEF de utilizar  $H_{1/10}$  para escolleras naturales (Iribarren y Hudson) y  $H_s$  para cualquier tipo de unidad artificial de manto. La fórmula de Miguel Losada presenta un tratamiento concreto especificado por su autor mediante  $H_D = \lambda \times H_s$ .
- En aguas someras, se recomienda el empleo de  $H_{1/10}$  en las expresiones de Iribarren y Hudson.
- Con relación al concepto “bloques”, debemos ser respetuosos con el lenguaje y las posibles traducciones a otros idiomas de los trabajos del Grupo. Por esta razón, el concepto de bloque artificial es aplicable a todo elemento artificial, cúbicos, tetrápodos, acrópodos, bloques paralelepípedicos. Por esta razón y circunstancia, cuando nos referimos a bloques  $a \times a \times 1.30 a$ , por citar un ejemplo, debe siempre exigirse el uso de la palabra “paralelepípedicos”.
- En relación a la comparación entre el modo de fallo de los bloques cúbicos y los paralelepípedicos, no existe investigación sistemática que permita obtener conclusiones científicamente fiables relativas a su comparación, salvo las diferentes funciones de estabilidad de Losada y Desiré. Se debería investigar ya que parece que los bloques paralelepípedicos son menos proclives al adoquinado que los bloques cúbicos.
- Por esta circunstancia, se propone una línea de investigación basada en ensayos sistemáticos de las mismas secciones de rompeolas con mantos de bloques cúbicos y bloques paralelepípedicos del mismo peso unitario para conocer la curva evolutiva de daños y su comportamiento frente a los mismos estados de mar, tanto a estabilidad estructural como hidráulica.
- El concepto de suelo, y, por tanto, la interacción suelo-estructura es una componente fundamental en el sistema dique o muelle; que resulta complicada en la introducción de la probabilidad de fallo. En este sentido, se hace necesario adecuar la próxima ROM 1.1 (Diques) a lo que se establezca para el conjunto de los diques de abrigo en la ROM 0.5/2005, de manera que el proceso de diseño sea coherente en su conjunto, es decir, la cimentación, la acción y las componentes del dique en una correcta interacción suelo-estructura y acción-estructura.
- Deben establecerse los diagramas de fallo y la distribución de la probabilidad de fallo entre los diferentes modos. Resulta clave el estudio del grado de correlación entre los distintos modos de fallo, ya que éstos en un dique dependen del conjunto de variables de proyecto que, en gran medida, son comunes a casi todos ellos (variables que definen el estado de mar y la geometría general de la obra, por ejemplo) y están concatenados.

# INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

- Debe concretarse el nivel de avería admisible en el diseño de un rompeolas, si éste es reparable o no durante su vida útil, lo que condiciona su diseño a daño nulo o con un coeficiente de seguridad en las unidades del manto ( $C_s \approx 1.10-1.20$ ).
- El uso de elementos en el manto de peso superior, en algunos casos, no equivale a un incremento económico de la sección debiendo analizar todas las variables que intervienen en el proceso constructivo.
- El dique como sistema requiere también de un proceso de optimización económica.

Esta investigación supone la continuación del artículo expuesto en Algeciras (octubre 2006) por el Grupo pretendiendo aclarar, matizar y reflexionar sobre la validez de las fórmulas de diseño preliminar de las unidades o elementos de los mantos principales de los diques rompeolas. Se adjuntan como apéndice las fichas justificativas del trabajo realizado para las distintas secciones o tramos de diques rompeolas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Recomendaciones para Obras Marítimas. Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias. Parte I. ROM 0.0. Ministerio de Fomento. Puertos del Estado. 2001.
2. Recomendaciones para Obras Marítimas. Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias. ROM 0.2/90. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. 1990.
3. Grupo de Trabajo GT2 de Ingeniería Portuaria. Evaluación de las distintas fórmulas de cálculo de la estabilidad hidráulica de los elementos del manto de un dique rompeolas. II Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas. "Puertos: Diques y Obras Singulares y Costas: Gestión de zonas costeras". Algeciras, 18 al 20 octubre 2006. Puertos del Estado. Octubre 2006.
4. Inventario de Diques de Abrigo de España. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Dirección General de Puertos y Costas. 1988. Tomos I, II y III.
5. ROM 1.1. Diques de abrigo frente a las oscilaciones del mar. Puertos del Estado. Ponencia. Miguel A. Losada. Documento de Trabajo – Borrador. 2004.
6. Página web del Organismo Público Puertos del Estado. [www.puertos.es](http://www.puertos.es) Oceanografía y Meteorología. Fuentes de Datos. Oleaje. Regímenes de extremos actualizados en el litoral español a diciembre de 2005.
7. Handbook of Coastal and Ocean Engineering. Volume I. Wave Phenomena and Coastal Structures. Chapter 21. Recent development in the design of mound breakwaters. Losada, M. A. 1990.
8. Diseño óptimo de un dique. Laboratorio de Puertos "Ramón Iribarren". Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Dirección General de Puertos y Costas. Del Moral Carro, Rafael y Escutia Celdá, Rafael. 1979.
9. Diseño de Diques Rompeolas. Negro Valdecantos, V. y Varela Carnero, O. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Colección Señor, 28. Segunda Edición. 2008.
10. Recomendaciones para Obras Marítimas. Recomendaciones geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias. ROM 0.5/2005.
11. Burcharth, H. Hawkins, S. J. Zanuttigh, B. and Lamberti, A. Environmental Design Guidelines for low crested Coastal Structures. DELOS. Elsevier.



*Figura 8. Morro de hormigón de alta densidad en tres capas Ashdod, Israel. Julio 2007.*



*Figura 9. Composición del Grupo de Ingeniería Portuaria CT2.*

# INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

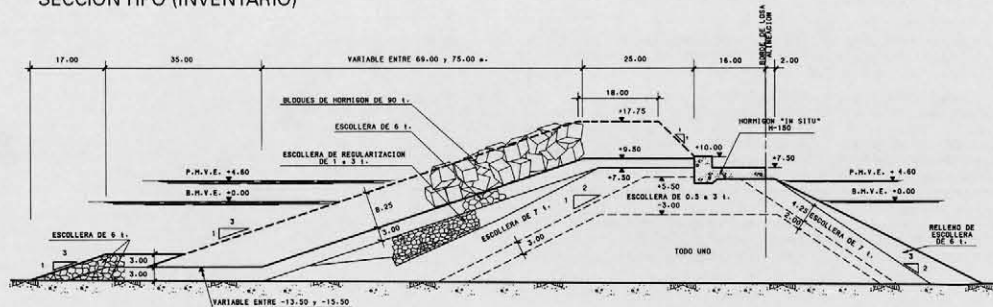
## COMPOSICIÓN DEL GRUPO

Sector	Nombre	Institución	Teléfono	Correo electrónico
Consultoras	José M. Berenguer Pérez	Berenguer Ingenieros	91.7364087	<a href="mailto:berenguer@beringenieros.com">berenguer@beringenieros.com</a>
	Eva Coba Castro	Intecsa - Inarsa	91.5673828	<a href="mailto:eva.coba@snclavalin.com">eva.coba@snclavalin.com</a>
	José M. Valdés Fernández	EPTISA	63753.53.61	<a href="mailto:jvaldes@eptisa.es">jvaldes@eptisa.es</a>
	José S. López Gutiérrez	DHI España - UPM	656.69.59.60	<a href="mailto:JSLOPEZ@telefonica.net">JSLOPEZ@telefonica.net</a>
	José Luis Monsó de Prat	Euoprincipia	93.5866130	<a href="mailto:joseluis.monso@euoprincipia.es">joseluis.monso@euoprincipia.es</a>
	Miguel A. Gómez Caldito	ALATEC	91.336.5959	<a href="mailto:macaldito@alatec.es">macaldito@alatec.es</a>
	Jorge Flores Guillén	KV Consultores	91.4261715	<a href="mailto:jflores@kvconsultores.es">jflores@kvconsultores.es</a>
	Antonio Berruguete Navarro	Iberport	96.3161595	<a href="mailto:aberruguete@iberport.com">aberruguete@iberport.com</a>
Constructoras	Izaskun Benedicto Iruín	PROES	91.3454565	<a href="mailto:ibenedicto@proes.es">ibenedicto@proes.es</a>
	Francisco Esteban Lefler	FCC Construcción	91.3859066	<a href="mailto:festeban@fcc.es">festeban@fcc.es</a>
	Antonio Corredor Molguero	SATO	91.3484740	<a href="mailto:acorred@ohl.es">acorred@ohl.es</a>
	Miguel Vázquez Romero	DRAGADOS	91.7038613	<a href="mailto:mvazquezr@dragados.com">mvazquezr@dragados.com</a>
Universidad	Vicente Negro Valdecantos	UPM	91.3366691	<a href="mailto:vnegro@caminos.upm.es">vnegro@caminos.upm.es</a>
	Ovidio Varela Carnero	UPM	91.3366757	<a href="mailto:ovivarela@telefonica.net">ovivarela@telefonica.net</a>
	César Vidal Pascual	Universidad Cantabria	942.201810	<a href="mailto:vidalc@unican.es">vidalc@unican.es</a>
CEDEX	Antonio Baonza González	Laboratorio de Puertos	91.3357700	<a href="mailto:baonza@cedex.es">baonza@cedex.es</a>
Admón. portuaria	Juan A. Rodríguez Pardo	Portos de Galicia	902.400870	<a href="mailto:jrpardo@ciccp.es">jrpardo@ciccp.es</a>
	Jorge Nasarre López	AP Baleares	971.228150	<a href="mailto:jnasarre@portsdebalears.com">jnasarre@portsdebalears.com</a>
	Javier Uzcanga Salas	AP Barcelona	93.2986062	<a href="mailto:javier_uzcanga@apb.es">javier_uzcanga@apb.es</a>
	Victoria Bajo	AP Coruña	981.219616	<a href="mailto:vbajo@puertocoruna.com">vbajo@puertocoruna.com</a>
	Enrique Maciñeira	AP Coruña	981.219617	<a href="mailto:emacineira@puertocoruna.es">emacineira@puertocoruna.es</a>
	Ignacio de la Peña Zarzuelo	Unión Fenosa Gas	91.2079797	<a href="mailto:ipena@unionfenosagas.com">ipena@unionfenosagas.com</a>
	Ignacio Rodríguez Sánchez	Puertos del Estado	91.5245538	<a href="mailto:irarevalo@puertos.es">irarevalo@puertos.es</a>
	Ana Lope Carvajal	Puertos del Estado	91.5245500	<a href="mailto:alope@puertos.es">alope@puertos.es</a>
	Gonzalo Gómez Barquín	Puertos del Estado	91.5245566	<a href="mailto:gbarquin@puertos.es">gbarquin@puertos.es</a>

## Sección del morro del Dique Norte del Puerto de San Ciprián (Lugo)

TRAMO ..... III  
 FECHA DE FINALIZACIÓN DE LAS OBRAS ..... 1983

## SECCIÓN TIPO (INVENTARIO)



## CARACTERÍSTICAS DEL MANTO PRINCIPAL (fuente inventario)

PIEZAS TIPO ..... Bloques  
 DIMENSIONES ..... 3.20X3.20X3.80  
 TALUD ..... 3/1  
 N.º DE CAPAS ..... 2

PESO ..... 90 t  
 PESO ESPECÍFICO ..... 2.35 t/m³  
 PROFUNDIDAD ..... > limitación  
 por fondo. Bermas entre 13.50 y 15.50 m

## CRITERIOS DE PROYECTO SEGÚN ROM 0.0

IRE ..... > 20

ISA ..... < 5

VIDA ÚTIL ..... 50 años

PROBABILIDAD ..... 0.20\*

PERÍODO DE RETORNO (T) ..... 225 años

\* Se asigna toda la probabilidad de fallo al modo  
 "Extracción de placas del manto principal"

## CARACTERÍSTICAS DE CLIMA MARÍTIMO

## Según inventario

H<sub>incidente</sub> ..... 10.50 m  
 Riesgo del 28%

H<sub>cálculo</sub> ..... 14.50 m  
 Riesgo del 3%

Los ensayos en Delft con E: 1/51 en 2D fueron  
 con oleaje irregular en tronco y E:1/68 3D en morro

## Actualización

H<sub>s</sub> ..... 10.70 m

H<sub>S,90%</sub> ..... 11.60 m

T<sub>p</sub> ..... 15.21 s

Carrera de marea ..... 4.60 m

Datos procedentes de las Boyas escalares de Gijón  
 y A Coruña. Puntos WANA. Hay propagación

## COMPROBACIÓN DE LA SECCIÓN

## Manto según Berenguer

ALT. SIGNIFICANTE DE DISEÑO ( $H_s$ )	10.7 m
PERÍODO MEDIO ( $T_m$ )	12.6 s
PESO ESPECÍFICO ( $\gamma_A$ )	2.35 t/m <sup>3</sup>
TALUD $\cot\alpha$	3
DAÑO ( $N_{od}$ )	0.00
PROFUNDIDAD AL PIE	20.00 m
PESO PIEZAS DEL TRONCO	123.1 t
PESO PIEZAS DEL MORRO	228.5 t

## Manto según Iribarren

ALTURA DE DISEÑO ( $H_d$ )	13.37 m
TALUD $\cot\alpha$	3
PESO ESPECÍFICO ( $\gamma_A$ )	2.35 t/m <sup>3</sup>
TIPO DE PIEZAS	BLOQUES
TIPO DE INCIDENCIA	NORMAL
PESO DE ELEMENTOS (W)	85.35 t
EQUILIBRIO	ARRIBA

## Manto según Hudson

ALTURA DE DISEÑO ( $H_d$ )	10.70 m
TALUD $\cot\alpha$	3
PESO ESPECÍFICO ( $\gamma_A$ )	2.35 t/m <sup>3</sup>
COEF. DE ESTABILIDAD ( $K_d$ )	5
PESO DE ELEMENTOS (W)	88.8 t

## Manto según Van der Meer. Piezas artificiales

ALT. SIGNIF. DE DISEÑO ( $H_d$ )	10.70 m
PERÍODO MEDIO ( $T_m$ )	12.7 s
PESO ESPECÍFICO ( $\gamma_A$ )	2.35 t/m <sup>3</sup>
NÚMERO DE OLAS (N)	3.000
DAÑO ( $N_{od}$ )	0.50
TIPO DE PIEZAS	CUBOS
PESO	166.34 t
$S_{Om}$	0.0427

## Manto según Losada

ALTURA DE DISEÑO ( $H_d$ )	10.7 m
PERÍODO MEDIO ( $T_m$ )	13 s
$\lambda$ ( $H_d/H_s$ )	1.8
TALUD $\cot\alpha$	3
PESO ESPECÍFICO ( $\gamma_A$ )	2.35 t/m <sup>3</sup>
PESO	140.38 t

Van der Meer proporciona 166 t para 3/2, es decir, 83 t para 3/1.

## AJUSTE A LA SECCIÓN EXISTENTE

- Van der Meer con  $N_{ol} = 0.50$  y  $N = 3.000$  olas; Berenguer con  $N_{od} = 0$  proporciona pesos superiores a los existentes
- Hudson funciona bien con  $H_s$  y  $H1/10$
- Iribarren funciona bien con  $A = 1.25 \times H$
- Losada proporciona pesos superiores a los dispuestos



## COMPORTAMIENTO A LA SECCIÓN (Averías, refuerzos, etc.)

Cambio de talud en la sección 3 y morro, con filtro de 6 t en dos capas, regularización trapecial hasta alcanzar el talud, sobre filtro de escollera de 7 t en dos capas con siguiente filtro de escollera de 0.50 a 3 t en dos capas. Retirada del mano de dolos (2.5% de rotos). Limitación en rotura. Rebase.

¿Se ha superado el temporal de cálculo? *NO*, el mayor temporal registrado en la fuente del Inventario fue el 16 de diciembre e 1986, con  $H_s = 8-9$  m,  $H_{max} = 16.50$  m y  $T = 18.00$  s con una duración de 24 h

## COMENTARIOS

El dique se hizo por vertido marítimo hasta la  $-3.00$  m y directo hasta  $+7.50$  m, rebajando al nivel  $+5.50$  m para la ejecución de la losa

## FOTOGRAFÍA ILUSTRATIVA



